

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Marija Bišćan

Zagreb, 2011.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauperl

Student:

Marija Bišćan

Zagreb, 2011.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru Prof.dr.sc. Zdravku Schauperlu što mi je omogućio da radim praktični završni rad.

Zahvaljujem se Dr.sc.Anti Bakiću na stručnoj pomoći tokom ispitivanja.

Zahvaljujem se kolegi Danijelu Drezgi na pomoći i strpljenju.

SADRŽAJ

SADRŽAJ	1
POPIS SLIKA	2
POPIS TABLICA	3
POPIS OZNAKA	4
SAŽETAK	5
1. UVOD	6
2. TEORIJA SENDVIČ KOMPOZITA	7
2.1. Slojeviti kompoziti (laminati)	8
2.2. Sendvič kompoziti	12
3. VRSTE OPTEREĆENJA KOMPOZITA	15
3.1. Tlak	15
3.2. Vlak	15
3.3. Smicanje	15
3.4. Savijanje	16
4. PROIZVODNI POSTUPCI ZA IZRADU KOMPOZITA	17
4.1. Ručno laminiranje u otvoreni kalup	17
4.2. Vakuumiranje	18
4.3. Proces u autoklavu	19
5. EKSPERIMENTALNI DIO	20
5.1. Specifikacije proizvodnog postupka	20
5.2. Laminiranje	21
5.3. Spajanje jezgre i laminata	23
5.4. Polimerizacija kompozita	24
5.5. Rezanje uzoraka	25
5.6. Ispitivanje sendvič kompozita po ASTM C365 – 03	25
6. REZULTATI ISPITIVANJA	28
6.1. Tehnologija izrade tlačnim opterećenjem	28
6.2. Tehnologija izrade vakuumom	29
6.3. Usporedba tehnologija izrade	31
7. ZAKLJUČAK	33
8. LITERATURA	34

POPIS SLIKA

Slika 1. Sendvič kompozit	7
Slika 2. Ugljična vlakna	8
Slika 3. Staklena vlakna	9
Slika 4. Aramidna vlakna.....	10
Slika 5. Različiti uzorci jednosmjernog tkanja	11
Slika 6. Aramidna sačasta jezgra	14
Slika 7. Tlačno opterećenje.....	15
Slika 8. Vlačno opterećenje	15
Slika 9. Smično opterećenje.....	16
Slika 10. Savojno opterećenje.....	16
Slika 11. Ručno laminiranje u otvoreni kalup	17
Slika 12. Vakuumiranje	18
Slika 13. Tkanina u pripremi za laminiranje.....	22
Slika 14. Vaganje komponenti matrice	22
Slika 15. Ručno laminiranje.....	23
Slika 16. Postavljanje jezgre na donju koru.....	23
Slika 17. Vakuumiranje sendvič kompozita u peći.....	24
Slika 18. Uzorci prije ispitivanja	25
Slika 19. Ispitivanje uzorka.....	26
Slika 20. Tlačno opterećen uzorak.....	26
Slika 21. Tehnologija izrade tlačnim opterećenjem.....	29
Slika 22. Tehnologija izrade vakuumom	30
Slika 23. Usporedba tehnologija izrade tlakom i vakuumom	31

POPIS TABLICA

Tablica 1. Fizikalna svojstva matrice.....	20
Tablica 2. Svojstva ugljičnih vlakana	21
Tablica 3. Mehanička svojstva jezgre	21
Tablica 4. Rezultati ispitivanja i proračuna za tlačno opterećenje.....	28
Tablica 5. Rezultati ispitivanja i proračuna za vakuumiranje.....	30

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
F	N	Sila
A	mm ²	Površina
t	mm	Debljina jezgre kompozita
u	mm	Pomak
σ	MPa	Tlačna čvrstoća
E	MPa	Modul elastičnosti
S	N/mm	Nagib linearnog dijela krivulje sila-pomak

SAŽETAK

Ovaj rad obuhvaća izradu sendvič kompozita te ispitivanje uzoraka sendvič kompozita prema normi ASTM C365 – 03. Ta norma služi za određivanje osnovnih mehaničkih svojstava sendvič kompozita – tlačne čvrstoće i modula elastičnosti. Obrađena je teorija sendvič kompozita uz prikaz materijala matrica i jezgri te njihovih svojstava. Opisani su i procesi proizvodnje sendvič kompozita. Prilikom izrade sendvič kompozita, u sklopu ovog rada, korištene su dvije različite tehnologije izrade, tehnologija izrade tlačnim opterećenjem i tehnologija izrade vakuumiranjem. Rezultati dobiveni ispitivanjem uzoraka poslužili su za usporedbu tih dviju tehnologija izrade.

1.UVOD

Kompoziti zbog svoje male gustoće, a ujedno dobrih mehaničkih svojstava postaju glavni materijali sa širokom upotrebom. Pri izboru materijala u konstrukciji razmatra se više faktora, ali jedan od najbitnijih su mehanička svojstva odnosno ponašanje materijala pod različitim vrstama opterećenja. Jedna od osnovnih prednosti kompozitnih materijala je što se njihova svojstva mogu dizajnirati prema zahtjevima. Ovaj rad obuhvaća izradu sendvič kompozita koji se sastoje od aramidne sačaste (Nomex) jezgre i kora od ugljičnih vlakana, koji su potom ispitivani po normi ASTM C365 – 03. Tim ispitivanjem određuje se tlačna čvrstoća i modul elastičnosti samog kompozita, odnosno njegove jezgre jer kore u tom slučaju samo ravnomjerno raspoređuju opterećenje. Tlačna čvrstoća i modul elastičnosti su temeljna mehanička svojstva jezgri sendvič kompozita koja se koriste u konstruiranju sendvič panela. Iz krivulje sila – pomak moguće je izračunati tlačno naprezanje za bilo koju silu (npr. tlačno naprezanje za maksimalnu silu) i modul elastičnosti jezgre. Testna metoda provedena u ovom radu je standardna metoda za određivanje tlačne čvrstoće i modula elastičnosti u konstruiranju, istraživanju i razvoju sendvič kompozita.

2. TEORIJA SENDVIČ KOMPOZITA

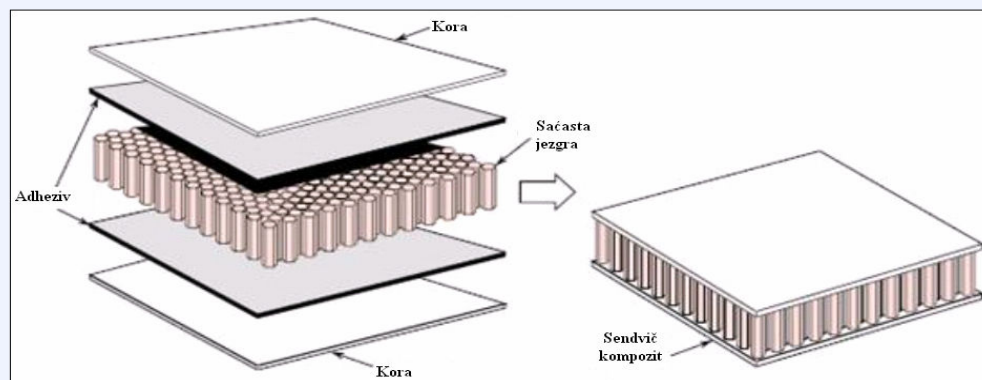
Kompozitni materijali ili kompoziti su dobiveni umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s ciljem dobivanja materijala takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe.

Dijele se prema materijalu matrice i obliku ojačala. Matrica može biti metalna, polimerna ili keramička.

Prema obliku ojačala kompozite dijelimo na:

- kompozite ojačane česticama
- kompozite ojačane vlaknima
- strukturne kompozite

Svojstva kompozita ne ovise samo o svojstvima komponenata već i o geometrijskom rasporedu elemenata konstrukcije. Kompoziti se dijele na slojevite kompozite (laminata) i sendvič konstrukcije. U zrakoplovstvu se primjenjuju sendvič materijali površinskih slojeva načinjenih od laminata te jezgre u obliku pčelinjih saća (šesterokutne ćelije), slika 1. Sendvič kompoziti se najčešće koriste za izradu oplata krila, trupa i repa zrakoplova.



Slika 1. Sendvič kompozit

2.1. Slojeviti kompoziti (laminati)

Laminati su slojeviti kompoziti koji se koriste za kore sendvič kompozita. Sastoje se od slojeva vlaknastih kompozita koji se mogu složiti tako da omoguće optimalna mehanička svojstva samog laminata s obzirom na opterećenje. Svojstva laminata određena su svojstvima vlakana, svojstvima matrice, udjelom vlakana u kompozitu i njihovom orijentacijom.

2.1.1 Vlakna

U zrakoplovstvu se koriste ugljična, staklena i aramidna vlakna. Osnovni zadaci vlakana su prihvati opterećenja (kod konstrukcijskih kompozita vlakna nose 70-90 % opterećenja), osiguravaju čvrstoću, krutost i toplinsku stabilnost, prema zahtjevu osiguravaju električnu vodljivost ili izolaciju. Glavni čimbenici pri odabiru vlakana su: osnovna svojstva samih vlakana, adhezija vlakana i smole, udio vlakana u kompozitu te orijentacija vlakana u kompozitu.

Ugljična vlakna

Ugljična vlakna, slika 2., se najčešće primjenjuju za ojačanje polimernih kompozita u zrakoplovstvu. Od svih vlaknastih materijala za ojačanje imaju najveći specifični modul i najveću specifičnu čvrstoću.



Slika 2. Ugljična vlakna

Visoki vlačni modul i visoku čvrstoću zadržavaju i pri povišenim temperaturama. Na sobnoj temperaturi vlakna su otporna na vlagu i niz otapala, kiselina i baza. Jedini nedostatak ugljičnih vlakana je cijena koja varira ovisno o vrijednosti vlačnog modula elastičnosti.

Staklena vlakna

Staklo se jednostavno iz rastaljenog stanja izvlači u obliku visokočvrstih vlakana. Staklena vlakna su prikazana na slici 3.



Slika 3. Staklena vlakna

Budući da su staklena vlakna relativno čvrsta, kada ih se uloži u polimernu matricu dobiva se kompozit vrlo visoke specifične čvrstoće. Kombiniranjem s različitim polimerima postiže se kemijska inertnost što omogućuje primjenu u korozivnoj okolini.

Aramidna vlakna

Aramidna vlakna, slika 4., su visokočvrsta i visokokruta. Od svih komercijalno dostupnih ojačala posjeduju najvišu specifičnu čvrstoću. U usporedbi sa ugljičnim vlaknima imaju lošiju tlačnu čvrstoću. Aramidna vlakna su otporna na udar i na umor materijala. Zbog svoje otpornosti na zapaljenje najviše se koriste u zrakoplovstvu. Glavni nedostaci

aramidnih vlakana su slaba adhezija s matricom i higroskopna svojstva. U usporedbi sa staklenim vlaknima, aramidna vlakna su skuplja.



Slika 4. Aramidna vlakna

Udio vlakana u kompozitu

Važan faktor je promjer samih vlakana. Krutost i čvrstoća laminata rastu proporcionalno sa udjelom vlakana do vršne vrijednosti nakon koje počinju padati zbog manjka smole potrebne da drži vlakna.

Orijentacija vlakana u kompozitu

Čvrstoća i krutost kompozita ovise o smjeru postavljanja vlakana u odnosu na smjer opterećenja. Smjerovi naprezanja se mogu prikazati kao vektori naprezanja koji se mogu podijeliti na:

vektor pod 0° djeluje kao aksijalno naprezanje

vektor pod 45° djeluje kao naprezanje na smicanje

vektor pod 90° djeluje kao bočno opterećenje

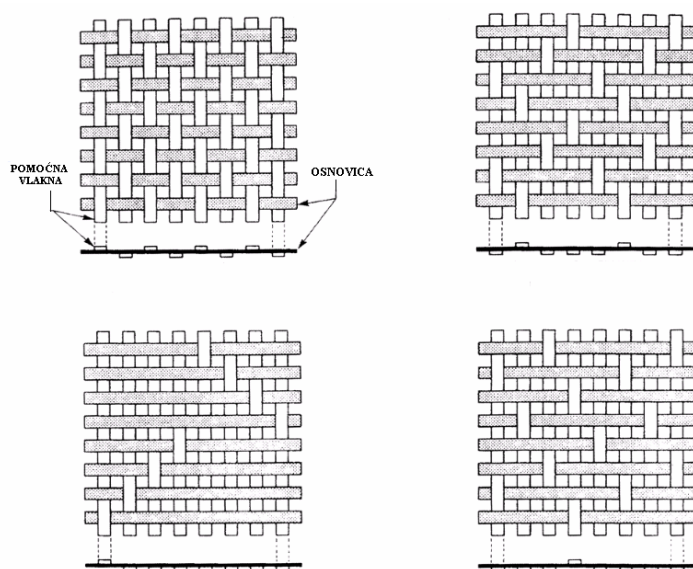
2.1.2. Tipovi tkanja

Tkanina je gotovi spoj dugih ugljičnih, staklenih ili aramidnih vlakana ili kombinacije istih u obliku tanke jednoslojne/višeslojne plahte. Tkanja su proizvedena ispreplitanjem osnovice (0°) i vlakana orijentacije 90° prema određenom uzorku. Integritet tkanja

očuvan je mehaničkim preplitanjem vlakana. Podatnost (sposobnost tkanine da se prilagodi složenim površinama), glatkoća površine i postojanost tkanine ovise najviše o tipu tkanja. Tipovi tkanja su opisani prema orijentaciji korištenih vlakana i načinu na koji su vlakna vezana. Četiri glavne orijentacije vlakana su: jednosmjerna, $0/90^\circ$, višeosna i nasumično orijentirana.

Jednosmjerno tkanje

Orijentacija vlakana kod kojeg je većina glavnih vlakana u istom smjeru zove se jednosmjerno tkanje, slika 5. Ovaj tip tkanja nije upleten; nema vlakana u smjeru okomitom na smjer tkanja. Ponekad se koriste mala poprečna vlakna da drže glavna vlakna na svom mjestu, ali se to ne smatra upletanjem.



Slika 5. Različiti uzorci jednosmjernog tkanja

Dvosmjerno ili višesmjerno tkanje

Ovom tipu tkanja pripadaju $0/90^\circ$, višeosna i nasumično orijentirana vlakna. Ovaj tip se naziva tako jer vlakna idu u 2 ili više smjerova. To su obično utkana vlakna i mogu se naći u puno različitih uzoraka.

2.1.3. Matrice

Materijal matrice mora ispuniti više funkcija. Matrica objedinjava vlakna i na njih prenosi opterećenje, te osigurava oblik i krutost konstrukcije. Isto tako osigurava dobru kvalitetu površine te štiti ojačavajuća vlakna od kemijskih utjecaja i mehaničkih oštećenja.

Polimerne matrice

Svi su polimeri sastavljeni od dugih lanaca molekula u kojima se ponavljaju jednostavne jedinice. Polimeri se dijele na plastomere i duromere obzirom na utjecaj topline na njihova svojstva.

Plastomeri mekšaju ili se tale sa povišenjem temperature, hlađenjem se ponovno stvrdnjavaju. Taj proces može se ponavljati bez utjecaja na sama svojstva materijala u bilo kojem stanju. Plastomeri uključuju najlon i polipropilen; mogu se ojačati, ali samo kratkim vlaknima.

Duromeri se oblikuju kemijskom reakcijom smole i otvrdnjivača ili smole i katalizatora. Kad se te dvije komponente pomiješaju, dolazi do nepovratne kemijske reakcije kojom nastaje čvrst netaljiv polimer. Nakon skrućivanja, duromeri se neće rastaliti sa povišenjem temperature, iako se iznad određene temperature njihova mehanička svojstva značajno mijenjaju. Ta temperatura poznata je kao temperatura staklišta T_g ; a varira ovisno o vrsti smole, stupnju skrućivanja i ispravnosti miješanja. Iznad temperature staklišta čvrstoća smole značajno opada, što ima za posljedicu opadanje tlačne čvrstoće kompozita.

U većini laminata koriste se 3 vrste matrice: poliesterska, vinilesterska i epoksidna. Epoksidne matrice zbog najboljih svojstava imaju najširu primjenu. Epoksidne matrice općenito pokazuju bolja mehanička svojstva od ostalih matrica i otpornost na okolišnu degradaciju zbog čega se koriste u zrakoplovnim dijelovima. Uz to imaju visoku čvrstoću u odnosu na gustoću, otporne su na kemikalije te imaju mali postotak stezanja [1].

2.2 Sendvič kompoziti

Sendvič materijali sastoje se od tankih vanjskih slojeva spojenih, ali i razdvojenih s lakim materijalom za popunjavanje, kao što je npr. polimerna pjena. Sendvič konstrukciju

karakterizira poboljšana čvrstoća i krutost u odnosu na čvrstoću i krutost materijala za popunjavanje i vanjskih slojeva.

Površinski slojevi nose opterećenje u smjeru ravnine, a također i poprečna naprezanja uslijed savijanja. Kao kore rabe se legure aluminijske, laminati, titan i čelik. Jezgra se suprotstavlja deformiranju u smjeru okomitom na površinski sloj i osigurava krutost u ravninama okomitima na površinski sloj.

2.2.1 Jezgre sendvič kompozita

Pjenaste jezgre

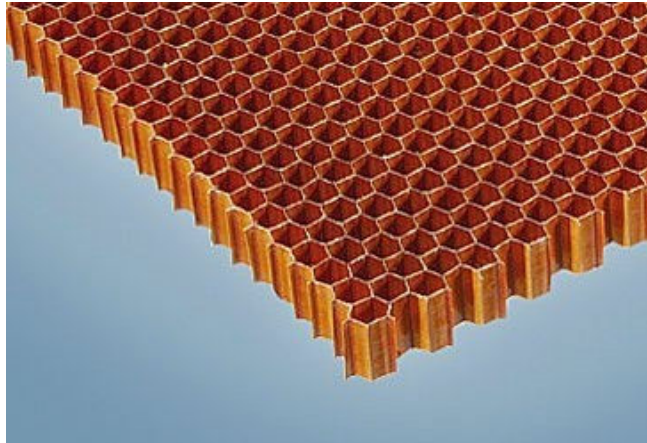
Pjene su jedan od najčešćih materijala koji se rabi za pune jezgre. Mogu se proizvesti od raznih sintetičkih polimera uključujući polivinil klorid PVC, polistiren PS i poliuretan PU. Otporne su na kemikalije, mogu se koristiti u širokom rasponu temperatura te ne upijaju vodu. Osim polimernih pjena koriste se i metalne pjene na bazi aluminijskih (Al), niklovih (Ni), cinkovih (Zn), magnezijevih (Mg) i titanovih (Ti) legura. Osnovna svojstva su im: niska gustoća, relativno visoka krutost, dobra izolacijska svojstva (toplina i zvuk), negorivost i odlična apsorpcija udarne energije.

Sačaste jezgre

Dostupne su u različitim materijalima, a mogu se proizvesti kao ravne ili zakrivljene kompozitne strukture.

Aluminijske saće imaju najveći omjer čvrstoće i gustoće od svih strukturnih materijala. Unatoč dobrim mehaničkim svojstvima i niskoj cijeni primjena im je ograničena zbog sklonosti koroziji.

Aramidne saće (Nomex) se, iako su najskuplje, koriste zbog visoke čvrstoće i otpornosti na požare, slika 6.



Slika 6. Aramidna saćasta jezgra

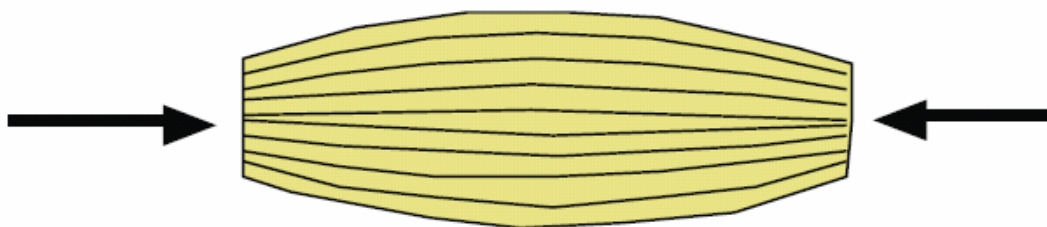
Drvo se može opisati kao prirodna saća jer je njegova struktura na mikroskopskoj razini slična heksagonalnoj strukturi sintetičkih saća. Mora se dobro zaštititi jer je podložno apsorpciji vlage te može istrunuti [1].

3. VRSTE OPTEREĆENJA KOMPOZITA

Postoje 4 glavne vrste opterećenja koje materijal mora izdržati: tlak, vlak, smicanje i savijanje [1].

3.1. Tlak

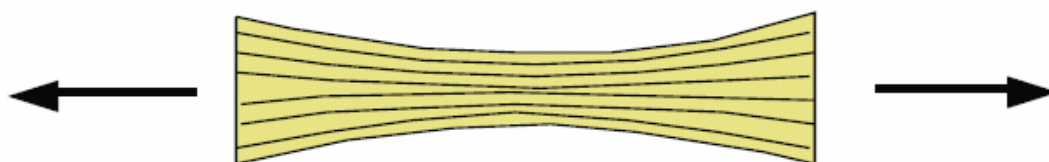
Kod tlačno opterećenog kompozita najvažnija su adhezija i tlačna čvrstoća matrice jer je uloga matrice da održi vlakna ravnima i spriječi njihovo izvijanje. Tlačno opterećenje kompozita prikazuje slika 7.



Slika 7. Tlačno opterećenje [1]

3.2. Vlak

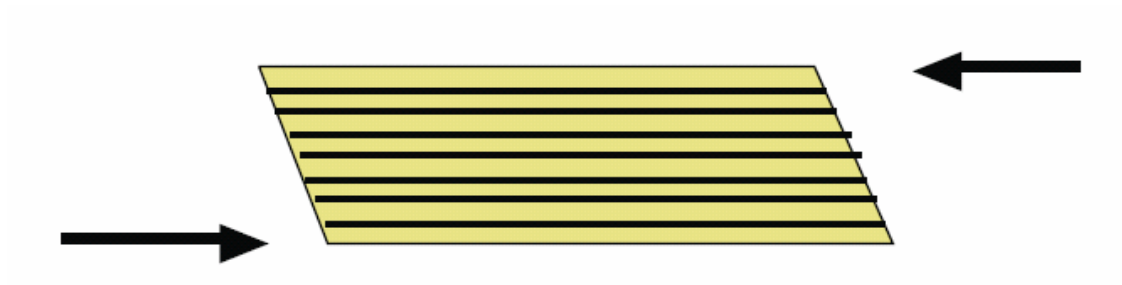
Ponašanje kompozita pri vlačnom opterećenju ovisi samo o vlačnoj čvrstoći i krutosti vlakana jer su svojstva matrice puno slabija. Vlačno opterećen kompozit prikazan je na slici 8.



Slika 8. Vlačno opterećenje [1]

3.3. Smicanje

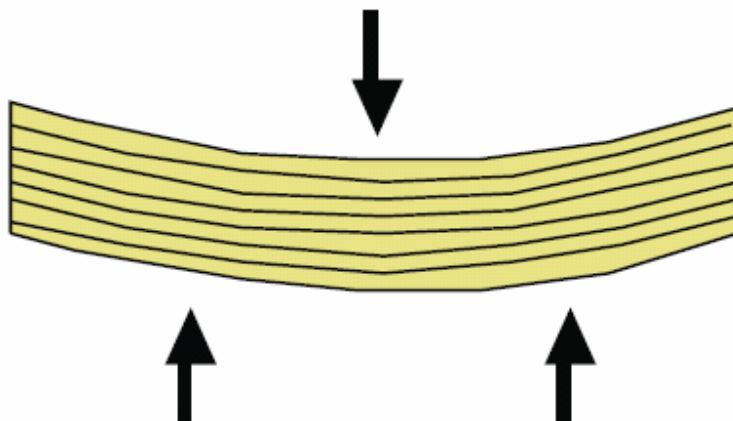
Uslijed smicanja, slika 9., matrica ima glavnu ulogu prenoseći naprezanja kroz kompozit. Kako bi kompozit izdržao ta naprezanja matrica mora imati dobra mehanička svojstva, ali i adhezijska svojstva prema vlaknima ojačala. Za prikazivanje ovog svojstva u laminatu koristi se međuslojna smična čvrstoća.



Slika 9. Smično opterećenje [1]

3.4. Savijanje

Savojna opterećenja su kombinacija tlačnih, vlačnih i smičnih opterećenja. Kada je kompozit opterećen kao na slici 10., gornja strana je tlačno, a donja vlačno opterećena, dok se u srednjem dijelu laminata odvija smicanje.

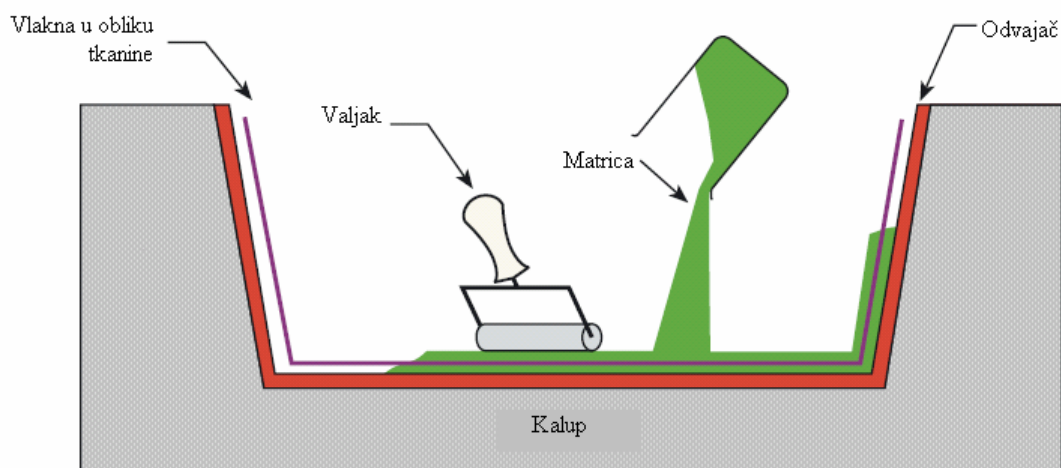


Slika 10. Savojno opterećenje [1]

4. PROIZVODNI POSTUPCI ZA IZRADU KOMPOZITA

4.1 Ručno laminiranje u otvoreni kalup

Laminati mogu biti ravni ili oblikovani prema krivulji, te zahtijevaju neki tip kalupa. Vlakna u obliku tkanine impregniraju se matricom, pritom se valjkom istiskuju zračni mjehurići kako bi se vlakna jednoliko namočila uz istiskivanje viška matrice. Nakon toga stavlja se drugi sloj matrice i vlakana te se postupak ponavlja. Ručno laminiranje prikazuje slika 11.



Slika 11. Ručno laminiranje u otvoreni kalup [1]

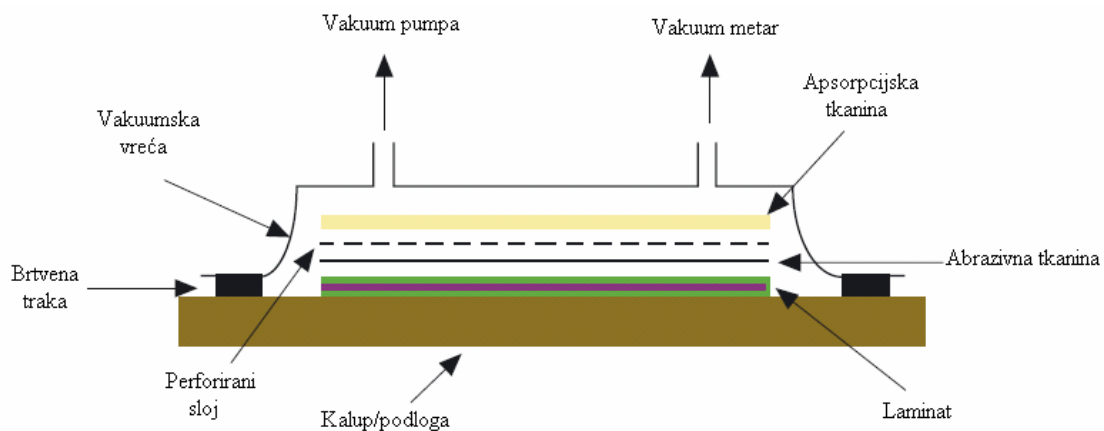
Za izradu kompozita ručnim laminiranjem mogu se koristiti epoksidna, poliesterska, vinilesterska i fenolna matrica. Matrice trebaju biti što niže viskoznosti kako bi bile pogodnije za rad rukama. Od vlakana se mogu koristiti sva, iako je guste aramidne tkanine teško ručno impregnirati.

Ovaj postupak izrade kompozita je jednostavan i zahtjeva jeftinu opremu te se stoga široko primjenjuje. Nedostaci postupka su miješanje matrice u točno određenom omjeru te zdravstveni i sigurnosni uvjeti zbog isparavanja matrice.

Ručno laminiranje se primjenjuje za izradu lopatica vjetroturbina, za izradu brodica te za arhitektonsko modeliranje.

4.2. Vakuumiranje

Vakuumiranje se ostvaruje postavljanjem plastične vakuumske vreće preko laminata te priključenjem na vakuum pumpu koja isisava zrak. Ovo je dodatak procesu laminiranja prilikom kojeg razlika atmosferskog tlaka i podtlaka unutar vreće služi za ostvarivanje dodatne sile koja djeluje na kompozit. Može se koristiti u kombinaciji s kalupima i autoklavom. Ova metoda koristi različite tlakove za ponekad složene oblike. Postupak vakuumiranja i korištena oprema prikazana je na slici 12.



Slika 12. Vakuumiranje [1]

Za izradu kompozita vakuumiranjem mogu se koristiti epoksidne i fenolne matrice te sve vrste vlakana. Vakuumiranjem je moguće izraditi laminate sa većim udjelom vlakana. U usporedbi sa ručnim laminiranjem, manji je udio nesavršenosti u samom kompozitu. Uslijed tlaka i bolje tečnosti matrice ostvaruje se bolja impregniranost vlakana. Zbog vakuumske vreće, koja smanjuje količinu štetnih produkata nastalih polimerizacijom, omogućeni su bolji sigurnosni i zdravstveni uvjeti. Za razliku od ručnog laminiranja, potrebni su dodatni troškovi, kao i bolje vještine radnika.

Vakuumiranje se primjenjuje za izradu dijelova krstarećih brodica, za izradu dijelova trkaćih automobila i za izradu dijelova lakih letjelica.

4.3. Proces u autoklavu

Kompoziti se postavljaju na površinu kalupa, vakuumiraju i zagrijavaju na temperaturu između 120°C i 180°C. Time se omogućuje smoli da teče i polimerizira. Dodatni tlak se ostvaruje u autoklavu (peć pod tlakom). Od matrica se za ovaj postupak koriste epoksidna, poliesterska i fenolna u kombinaciji sa bilo kojom vrstom vlakana. Kemijska reakcija matrice se može iskoristiti za optimalna mehanička i toplinska radna svojstva. Vrijeme rada i polimerizacije je kraće u odnosu na prethodno opisane postupke. Autoklavi su skupi, složeni za upravljanje i ograničavaju veličinu laminata. Oprema potrebna za izradu laminata, kao i sama jezgra kompozita, moraju moći izdržati proizvodne temperature i tlakove u autoklavu.

Proces izrade kompozitnih materijala u autoklavu se primjenjuje za zrakoplovne strukturne komponente (krila, repni dijelovi) i za F1 trkaće automobile.

5. EKSPERIMENTALNI DIO

U sklopu ovog rada proizveden je i ispitan sendvič kompozit. Za kore sendvič kompozita korišteni su laminati od ugljičnih vlakana i epoksidne matrice, dok je za jezgru korištena aramidna sačasta struktura. Tijekom proizvodnje kompozita korištene su dvije različite tehnologije izrade: opterećenje tlakom i vakuumiranje. Nakon izrade i polimerizacije kompozitnih ploča, izrezani su uzorci koji su potom ispitani po normi ASTM C365-03. Svrha samog ispitivanja je određivanje tlačne čvrstoće i modula elastičnosti sendvič kompozita te usporedba dviju tehnologija izrade.

5.1. Specifikacije proizvodnog postupka

Proizvodna tehnologija izrade uzoraka: laminiranje, tlačno opterećenje, vakuumiranje

Tip i materijal matrice: Epoksidna matrica

U tablici 1. prikazana su fizikalna svojstva komponenti matrice i same matrice nakon miješanja komponenti.

Tablica 1. Fizikalna svojstva matrice

	Smola	Otvrdnjivač
Pojedine komponente	Biresin CR122	Biresin CH 122-5
Viskozitet, 25°C, mPas	850	15
Gustoća, 25°C, g/ml	1,17	0,93
Omjer miješanja, težinski	100	30
Mješavina		
Vrijeme prerade, 100 g, sobna temperatura,	min.	190
Viskozitet mješavine, 25°C,	mPas	380

Tip i materijal ojačala: Ugljična vlakna

Broj slojeva tkanine: 4

U tablici 2. prikazana su svojstva ugljičnih vlakana korištenih pri izradi kora.

Tablica 2. Svojstva ugljičnih vlakana

Tlačna čvrstoća	3,53 MPa
Tlačni modul elastičnosti	230 GPa
Gustoća	1,76 g/cm ³
Promjer vlakna	7 µm
Kemijski sastav	Ugljik 93 % Na + K < 50 ppm

Materijal i struktura jezgre: Aramidna sačasta jezgra

Debljina jezgre: 10 mm

Mehanička svojstva aramidne jezgre sačaste strukture prikazana su u tablici 3.

Tablica 3. Mehanička svojstva jezgre

Oznaka proizvoda ECA		Tlačna čvrstoća, (N/mm ²)	
Veličina ćelija, mm	Gustoća, kg/m ³	minimalna	prosječna
3,2	48	1,9	2,10

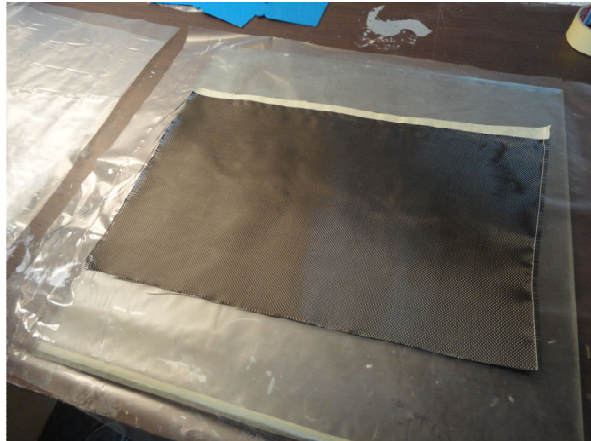
5.2. Laminiranje

Laminiranjem su izrađeni slojeviti kompoziti koji čine kore ispitnog sendvič kompozita.

Tokom izrade laminata korišteni su prethodno opisana matrica i vlakna.

5.2.1 Rezanje tkanine na mjeru

Tkanina se reže na jednake pravokutnike čija je veličina određena veličinom podloge. Potrebno je osam takvih pravokutnika jer se svaki laminat sastoji od 4 sloja. Materijal tkanine je ugljično vlakno, jednosmjerno tkanje gustoće 90g/m². Uz rezanje tkanine vrši se i rezanje najlona potrebnog za laminiranje. Prvi sloj tkanine u pripremi za laminiranje prikazuje slika 13.



Slika 13. Tkanina u pripremi za laminiranje

5.2.2 Priprema podloge

Podloga, u ovom slučaju staklena ploča, se čisti i premazuje voskom kako bi se kompozit nakon skrućivanja lakše odvojio. Glatka staklena površina služi kako bi se postigle što ravnije površine kora.

5.2.3 Miješanje matrice

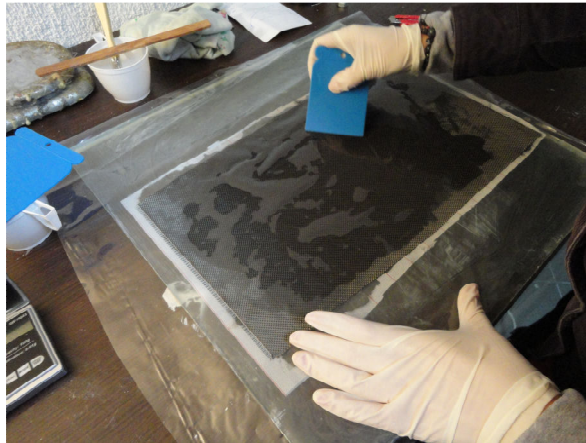
Komponente matrice – smola i otvrdnjivač - miješaju se u točno propisanom omjeru, koji je postignut vaganjem, slika 14. Prilikom miješanja komponenti potrebno je paziti na njihovu temperaturu. Smjesu je potrebno pažljivo umiješati dok se ne dobije glatka jednolična tekućina bez mjehurića zraka.



Slika 14. Vaganje komponenti matrice

5.2.4 Impregniranje slojeva laminata

Prije laminiranja prvog sloja na podlogu se stavlja abrazivna tkanina. Ona gotovom laminatu daje karakterističnu hrapavu površinu. Nakon toga slijedi ručno impregniranje slojeva ojačala pripremljenom matricom, slika 15. Za svaku koru potrebno je impregnirati po 4 sloja tkanine.



Slika 15. Ručno laminiranje

5.3. Spajanje jezgre i laminata

Nakon laminiranja slijedi spajanje saćaste jezgre sa gotovim laminatima iste veličine. Postavljanje jezgre na donju koru prikazuje slika 16. Mogu se koristiti različite tehnologije izrade; u ovom radu su za izradu kompozita korištene dvije – tlačno opterećenje i vakuumiranje. Kompozit se tijekom procesa skrućivanja opterećuje u svrhu što boljeg prijanjanja jezgre za kore.



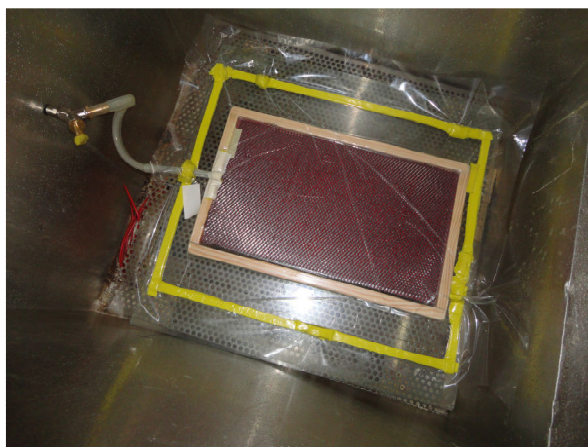
Slika 16. Postavljanje jezgre na donju koru

5.3.1 Opterećenje tlakom

U tehnologiji izrade pomoću tlačnog opterećenja na gotov sendvič kompozit postavljena je staklena ploča, koja se potom opterećuje utegom mase 20 kg. Tokom polimerizacije matrice u peći na kompozit je djelovala sila od 200N. Dimenzije ploča izrađenih ovom tehnologijom su 210×380 mm.

5.3.2 Vakuumiranje

Sendvič kompozit se stavlja na staklenu podlogu, oko njega se lijepi brtvena traka na koju se postavlja vakuumska vreća. Na spiralnu plastičnu cijev priključuje se vakuum pumpa koja isisava zrak ispod vakuumske vreće. Tokom skrućivanja matrice u peći na kompozit je djelovala sila od 6330 N uz postignuti 85%-tni vakuum. Dimenzije ploča izrađenih ovom tehnologijom su 210×350 mm. Na slici 17. prikazano je vakuumiranje sendvič kompozita u peći.



Slika 17. Vakuumiranje sendvič kompozita u peći

5.4. Polimerizacija kompozita

Neovisno o tehnologiji izrade opterećene ploče sendvič kompozita su stavljene u peć gdje se proces skrućivanja (cure process) odvijao na temperaturi od 70°C tokom 16 h. Potom je izvršen proces naknadnog skrućivanja (postcure process) u peći na temperaturi od 120°C tokom vremenskog perioda od 12 h.

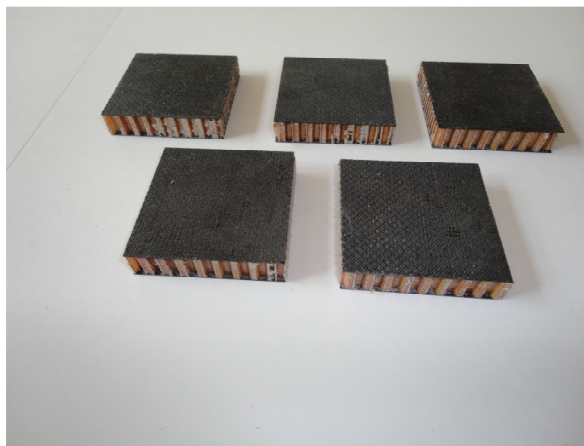
5.5. Rezanje uzoraka

Na gotove ploče sendvič kompozita ucrtavaju se uzorci dimenzija propisanih normom. Nakon toga, uzorci se režu i označavaju prema tehnologiji izrade. Slika 18. prikazuje uzorke prije ispitivanja.

Broj uzoraka: 5 konvencionalno impregniranih, tlačno opterećenih

5 konvencionalno impregniranih, vakuumiranih

Dimenzije uzoraka: $50 \times 50 \times 11,25$ mm



Slika 18. Uzorci prije ispitivanja

5.6. Ispitivanje sendvič kompozita po ASTM C365 – 03

Metoda ispitivanja koju norma ASTM C365-03 opisuje služi za određivanje tlačne čvrstoće u smjeru normale i modula elastičnosti jezgre sendvič kompozita [2].

5.6.1. Mjerni instrumenti

Propisuje se mjerna preciznost ispitnog uređaja. Nabrojani su mjerni uređaji potrebni za ispitivanje (sferične čeljusti kidalice, mikrometar, ispitni uređaj – kidalica).

5.6.2. Ispitni uzorci

Može se ispitivati sama jezgra ili uzorci sendvič kompozita. Uzorci moraju biti kružnog ili kvadratnog presjeka. Površina uzorka mora biti manja od 10000 mm^2 . Prema tipu jezgre i veličini saća propisana je minimalna površina uzorka; za sačaste jezgre ćelija

manjih od 6 mm površina ne smije biti manja od 2500 mm². Broj ispitnih uzoraka nije određen, ali za ispitivanje sa prihvatljivim rezultatima uzima se najmanje 5 uzoraka.

5.6.3. Postupak ispitivanja

Opterećenje se prenosi na uzorak preko čeljusti kidalice sferičnog presjeka tako da se opterećenje distribuira što ravnomjernije preko površine uzorka. Opterećenje se ostvaruje konstantnom brzinom pomaka tako da do maksimalnog opterećenja dođe nakon 3 do 6 minuta. Preporučena brzina pomaka čeljusti je 0,50 mm/min. Ispitivanje uzorka prikazano je na slici 19., dok slika 20. prikazuje tlačno opterećen uzorak.



Slika 19. Ispitivanje uzorka



Slika 20. Tlačno opterećen uzorak

5.6.4. Proračun

Tlačna čvrstoća jezgre u smjeru normale računa se prema formuli [2]

$$\sigma = \frac{F}{A} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (1)$$

gdje je: σ = tlačna čvrstoća jezgre, MPa

F = maksimalna sila, N

A = površina uzorka, mm²

Modul elastičnosti računa se prema formuli [2]

$$E = \frac{St}{A} = \frac{\Delta F}{\Delta u} \cdot \frac{t}{A} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (2)$$

gdje je: E = modul elastičnosti jezgre, MPa

$S = (\Delta F / \Delta u)$ nagib linearnog dijela krivulje sila-pomak, N/mm

u = pomak, mm

t = debljina jezgre, mm

6. REZULTATI ISPITIVANJA

Tokom ispitivanja zabilježeni su pomaci i pripadajuće sile za svaki uzorak. Pomoću Matlab-a određene su maksimalne sile i odgovarajući pomaci te su izračunate karakteristične veličine potrebne za određivanje tlačne čvrstoće i modula elastičnosti. Osnovna podjela uzoraka je prema tehnologiji izrade, pa su prema tome i rezultati tako interpretirani kako bi se jasno vidjela razlika između dvije tehnologije.

6.1. Tehnologija izrade tlačnim opterećenjem

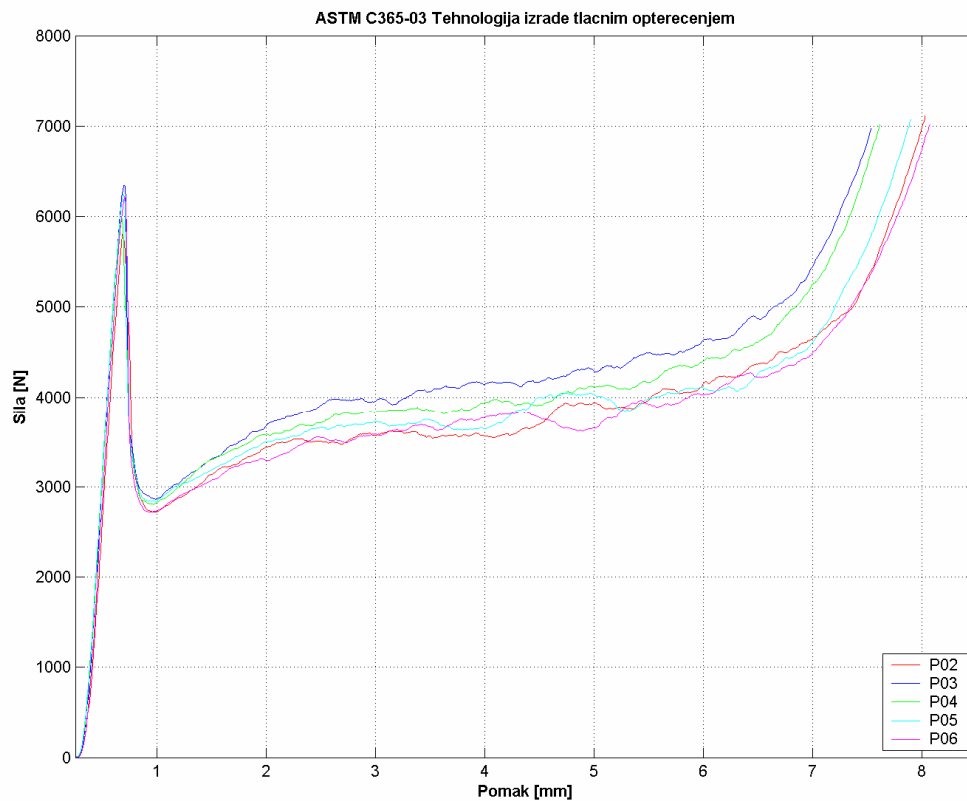
Za uzorke koji su polimerizirali opterećeni utegom izračunate su vrijednosti tlačne čvrstoće i modula elastičnosti dane u tablici 4.

Tablica 4. Rezultati ispitivanja i proračuna za tlačno opterećenje

Uzorak	Maksimalna sila F_{max} [N]	Tlačna čvrstoća σ [MPa]	Nagib krivulje $S = \Delta F / \Delta u$ [N/mm]	Modul elastičnosti E [MPa]
P02	5802,6	2,32	19126,8	76,5
P03	6347,1	2,54	19538,5	78,15
P04	5972,4	2,388	19066,8	76,3
P05	6246,9	2,49	19016,9	76,06
P06	6217,7	2,48	19335,2	77,34
Srednja vrijednost	6117,34	2,44		76,87

U tablicu nisu uvrštene konstantne vrijednosti površine A , koja je ista za svaki uzorak i iznosi 2500 mm^2 , te debljine jezgre t koja iznosi 10 mm .

Usporedbom svojstava same jezgre navedenih u tablici 3. i svojstava ispitanog kompozita može se primijetiti razlika između tlačne čvrstoće same jezgre i tlačne čvrstoće sendvič kompozita čija je jezgra dodatno ojačana korama, ali i smolom. Na slici 21. dan je dijagramski prikaz krivulja dobivenih ispitivanjem uzoraka izrađenih tehnologijom tlačnog opterećenja. Može se primijetiti kako se krivulje skoro podudaraju u elastičnom području, dok su razlike u maksimalnoj sili primjetnije.



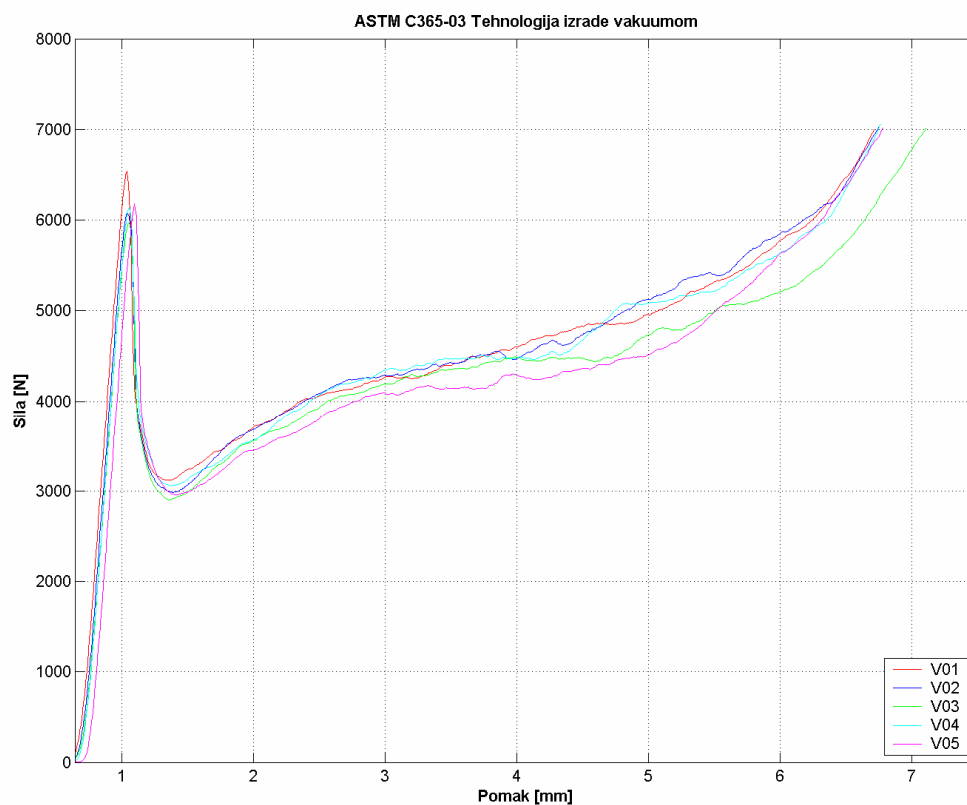
Slika 21. Tehnologija izrade tlačnim opterećenjem

6.2. Tehnologija izrade vakuumom

Vrijednosti tlačne čvrstoće i modula elastičnosti izračunate za uzorke izrađene tehnologijom vakuuma prikazane su u tablici 5. U tablicu nisu uvrštene konstantne vrijednosti površine A , koja je ista za svaki uzorak i iznosi 2500 mm^2 , te debljine jezgre t koja iznosi 10 mm. Na slici 22. dan je dijagramski prikaz krivulja dobivenih ispitivanjem uzoraka izrađenih tehnologijom vakuuma.

Tablica 5. Rezultati ispitivanja i proračuna za vakuumiranje

Uzorak	Maksimalna sila F_{max} [N]	Tlačna čvrstoća σ [MPa]	Nagib krivulje $S = \Delta F / \Delta u$ [N/mm]	Modul elastičnosti E [MPa]
V01	6543,9	2,62	19779,4	79,11
V02	6080,4	2,43	19893,2	79,57
V03	5966,8	2,38	19606,3	78,4
V04	6137,8	2,45	19515	78
V05	6182,8	2,47	19582,9	78,3
Srednja vrijednost	6182,34	2,47		78,7

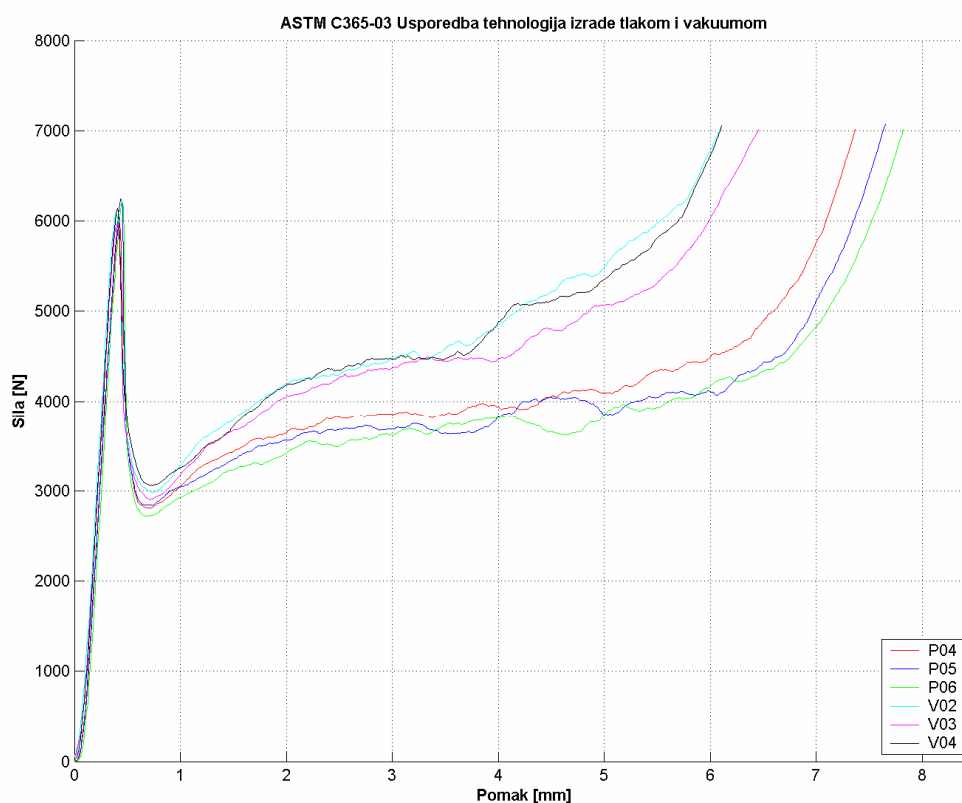


Slika 22. Tehnologija izrade vakuumom

Usporedbom rezultata ispitivanja i proračuna za obje tehnologije izrade jasno je vidljivo da su vrijednosti maksimalnih sila veće kod vakuumiranja, no ta razlika nije značajna. Uzimanjem svih vrijednosti tokom računanja srednjih vrijednosti nije počinjena velika pogreška jer su srednje vrijednosti vrlo bliske i nema velikih odstupanja.

6.3. Usporedba tehnologija izrade

Budući da je vakuumom postignuta veća sila, tokom polimerizacije došlo je do boljeg prijanjanja jezgre i kora. Zbog toga opravdano je očekivati bolje rezultate odnosno bolja svojstva uzoraka izrađenih tehnologijom vakuuma. Na slici 23. prikazane su krivulje dobivene ispitivanjem tlačnih i vakuumiranih uzoraka u svrhu usporedbe tih dviju tehnologija izrade.



Slika 23. Usporedba tehnologija izrade tlakom i vakuumom

Iako usporedbom tablica za svaku od tehnologija izrade nema značajnijih razlika, usporedbom krivulja u dijagramu razlika je jasno vidljiva. Površina ispod krivulja

vakuumiranih uzoraka je znatno veća. Iako su nakon maksimalne sile zidovi ćelija saća kod vakuumom ojačanih uzoraka kolabirali isto kao i kod tlačno ojačanih uzoraka, vakuumirani uzorci pružaju veći otpor daljnjem tlačnom opterećenju kidalice. Budući da je tokom vakuumiranja na ploče sendvič kompozita djelovala znatno veća sila, vakuum je povukao višak matrice iz kora na zidove ćelija jezgre te ih na taj način dodatno ojačao. Ako se usporede i pogledaju tlačno ojačani uzorci i vakuumom ojačani uzorci, kod vakuumom ojačanih uzoraka vidljiv je prijelaz polimerizirane matrice uz rubove jezgre što dokazuje pretpostavku.

7. ZAKLJUČAK

Ispitivanje sendvič kompozita propisano normom ASTM C365 – 03 daje realne prihvatljive rezultate tlačne čvrstoće i modula elastičnosti za sendvič kompozite. U sklopu ovog rada uspoređene su tehnologija izrade tlačnim opterećenjem i tehnologija izrade vakuumom. Na temelju vrijednosti dobivenih ispitivanjem i vrijednosti dobivenih proračunom ne može se zaključiti koja je od korištenih tehnologija izrade kvalitetnija. Razlika između tehnologija nije značajna jer sama metoda ispitivanja služi za određivanje mehaničkih svojstava jezgre, a tehnologije izrade služe za što bolje prijanjanje kora i jezgri. Tokom tehnologije izrade vakuumiranjem, uslijed djelovanja znatno veće sile dolazi do boljeg prijanjanja i tečenja matrice uz zidove ćelija jezgre. Nakon polimerizacije ta jezgra je ojačana i bolje podnosi tlačno opterećenje nametnuto tijekom ispitivanja, no to se manifestira tek u plastičnom području krivulje sila-pomak. Prilikom izrade tlačnim opterećenjem primjenjena sila je oko 30 puta manja, ali su vrijednosti tlačne čvrstoće i modula elastičnosti približno jednake onima za uzorke izrađene vakuumom. Srednja vrijednost maksimalne sile F_{max} za uzorke izrađene tehnologijom tlačnog opterećenja iznosi 6117,34 N, dok je za uzorke izrađene vakuumiranjem ta vrijednost jednaka 6182,34 N. Srednja vrijednost tlačne čvrstoće σ za uzorke izrađene tehnologijom tlačnog opterećenja iznosi 2,44 MPa, dok je ta vrijednost za vakuumirane uzorke jednaka 2,47 MPa. Srednja vrijednost modula elastičnosti E za uzorke izrađene tehnologijom tlačnog opterećenja iznosi 76,87 MPa, dok je ta vrijednost za uzorke izrađene tehnologijom vakuuma jednaka 78,7 MPa. Može se zaključiti da su obje tehnologije prihvatljive za izradu sendvič kompozita jer se uzorci u elastičnom području, neovisno o tehnologiji izrade, ponašaju jednako i postižu slične vrijednosti maksimalnih sila, tlačne čvrstoće i modula elastičnosti.

8. LITERATURA

- [1] Gurit – Guide to Composites (<http://www.gurit.com/>)
- [2] ASTM C 365-03 Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores